

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт
Электротехнология и электротехника
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В. Н. Тимофеев
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2016 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ЛАБОРАТОРНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ МАЛОЙ
ЕМКОСТИ ДЛЯ ЗАМЕШИВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.11 Электротехнологические установки и системы

Руководитель

фамилия

подпись, дата

к.т.н., доцент

должность, ученая степень

М.Ю. Хацаюк

инициалы,

Выпускник

фамилия

подпись, дата

И.В. Идельсон

инициалы,

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа БР по теме «Лабораторная индукционная
плавильная печь малой емкости для замешивания неметаллических нано
размерных частиц»

Нормоконтролер

подпись, дата

М.В. Первухин

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра «Электротехнология и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.Н. Тимофеев
подпись

« ____ » _____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Студенту Идельсону Игорю Викторовичу

Группа ФЭ 12-07Б Направление (специальность) 13.03.02

Электроэнергетика и электротехника

Тема выпускной квалификационной работы: «Лабораторная индукционная плавильная печь малой емкости для замешивания неметаллических наноразмерных частиц».

Утверждена приказом по университету № от 52831

Руководитель БР М.Ю. Хацаюк, доцент, к.т.н ,кафедра Электротехнологии и электротехники

Исходные данные для БР:

- Метал – алюминий;
- Диаметр тигля - 15мм;
- Высота тигля – 30мм;
- Время нагрева – 90с;
- Напряжение сети – 380В;
- Перечень разделов БР

- 1 Введение;
- 2 Обзорная часть;
- 3 Современные индукционные тигельные печи;
- 4 Аналитический расчет;
- 5 Численный расчет;
- 6 Экспериментальная часть;
- 7 Заключение;

- 8 Список используемой литературы;
- Перечень графического материала:

- 1 Сборочный чертеж;
- 2 Футеровка;
- 3 Индуктор;
- 4 Сборочный чертеж крышки;
- 5 Чертеж планки;
- 6 Чертеж шины;
- 7 Чертеж тигля;

Руководитель БР

подпись

Задание принял к исполнению

подпись

М.Ю. Хацаюк

И.В. Идельсон

«___» _____ 2016г

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
1. Обзорная часть	6
1.1 Конструкция печей	6
1.2 Малогабаритные тигельные печи	8
2. Современные индукционные тигельные печи	10
3. Аналитический расчет	17
4. Численный расчет	41
5. Экспериментальная часть	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	57
ПРИЛОЖЕНИЯ	59

ВВЕДЕНИЕ

Индукционные тигельные печи предназначены для плавки черных и цветных металлов. Они могут использоваться как в качестве основного агрегата для плавки твёрдой шихты, так и в качестве вторичного агрегата при дуплекс - процессе.

По конструкции плавильного тигля различают печи: с керамическим (футерованным) тиглем, с проводящим металлическим тиглем, с проводящим графитовым или графитошамотным тиглем, с холодным тиглем (водоохлаждаемым металлическим тиглем).

Для плавки твердой шихты могут применяться индукционные тигельные печи повышенной и промышленной частот, причём в последних свежая шихта обычно загружается в жидкий металл, оставшийся после слива металла от предыдущей плавки.

В настоящее время в России ИТП имеют достаточно широкий номенклатурный ряд, который перекрывает потребности цветной и чёрной металлургии, золотодобывающей промышленности, полупроводниковой промышленности, химической промышленности и других отраслей народного хозяйства. Из номенклатурного ряда можно выделить следующие, наиболее распространённые, типы ИТП: ИСТ - для плавки стали; ИЧТ - для плавки чугуна; ИЛТ - для плавки меди и сплавов на её основе; ИАТ - для плавки алюминиевых сплавов.

Индукционные тигельные печи повышенной частоты серии ИСТ применяются преимущественно для плавки легированных сталей и работают, в основном, на повышенных частотах, начиная от 500 Гц и до 2400 Гц. Плавка в них ведётся в основном при периодическом режиме, т.е. с полным сливом металла после каждой плавки. Печи серии ИСТ могут использоваться также для плавки чугуна и ферросплавов. Использование этих печей для плавки чугуна оправдано только при частых сменах выплавляемых марок и необходимости полного слива металла; при

применении одной и той же печи для плавки стали и чугуна; при применении печей емкостью менее одной тонны.

Рабочей частотой таких печей является повышенная частота 1000 Гц; 2400 Гц; 8000 Гц и 10000 Гц, а их ёмкость не превышает 2,5 тонн. По способу нагрева эти печи подразделяют на печи прямого нагрева, в которых токи индуцируются непосредственно в загрузке, и косвенного нагрева, в которых токи индуцируются во вспомогательном нагревателе, установленном между индуктором и загрузкой. По характеру работы вакуумные ИТП могут быть периодического и полу непрерывного действия.

Индукционные тигельные печи промышленной частоты серии ИЧТ предназначены для плавки и выдержки чугуна. Они должны эксплуатироваться в непрерывном режиме, т.е. с догрузкой твердой шихты в расплав, остающийся после слива очередной порции металла. Работа этих печей только на твердой шихте затруднена.

Печи ИТП могут использоваться также и в качестве миксеров (серия ИЧТМ). Их мощность в этих случаях должна быть достаточной только для покрытия тепловых и электрических потерь с небольшим запасом для возможности перегрева металла перед разливкой.

Особое место занимают индукционные вакуумные тигельные печи, которые применяются для плавки и рафинирования высоколегированных сталей, жаропрочных сплавов, редких, высокореакционных, радиоактивных и токсичных металлов и сплавов. К этим печам относятся печи серии ИСВ.

Применение для плавки алюминиевых сплавов индукционных печей повышенной частоты рекомендуется только тогда, когда к металлу предъявляются требования минимума окисных и газовых загрязнений. Конструкция этих печей обеспечивает отсутствие разрыва защитной поверхности окисной пленки вследствие циркуляции расплава. Особое место занимают индукционные вакуумные тигельные печи, которые

применяются для плавки и рафинирования высоколегированных сталей, жаропрочных сплавов, редких, высокореакционных, радиоактивных и токсичных металлов и сплавов. К этим печам относятся печи серии ИСВ. В остальных случаях применяются печи ИАТ работающие на промышленной частоте.

В зависимости от того, идет ли процесс плавки на открытом воздухе или в вакууме (в защитной атмосфере), различают печи: открытые (плавка на воздухе), вакуумные (плавка в вакууме), компрессионные (плавка под избыточным давлением). По организации процесса во времени различают печи: периодического действия, непрерывного действия, полу непрерывного действия.

Достоинства тигельных плавильных печей:

- выделение энергии непосредственно в загрузке, без промежуточных нагревательных элементов;

- интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в тигле, обеспечивающая быстрое плавление мелкой шихты и отходов, быстрое выравнивание температуры по объёму ванны и отсутствие местных перегревов, и гарантирующая получение многокомпонентных сплавов, однородных по химическому составу;

- принципиальная возможность создания в печи любой атмосферы (окислительной, восстановительной, нейтральной) при любом давлении (вакуумные или компрессионные печи);

- высокая производительность, достигаемая благодаря высоким значениям удельной мощности (особенно на средних частотах);

- возможность полного слива металла из тигля и относительно малая масса футеровки печи, что создает условия для снижения тепловой инерции печи благодаря уменьшению тепла, аккумулированного футеровкой. Печи этого типа весьма удобны для периодической работы с перерывами между плавками и обеспечивают возможность для быстрого перехода с одной марки сплава на другую;

- простота и удобство обслуживания печи, управления и регулирования процесса плавки, широкие возможности для механизации и автоматизации процесса;

- высокая гигиеничность процесса плавки и малое загрязнение воздушного бассейна.

К недостаткам тигельных печей следует отнести:

- Относительно низкую температуру шлаков, наводимых на зеркало расплава с целью его технологической обработки (шлак в ИТП разогревается от металла, поэтому его температура всегда ниже);

- Сравнительно низкая стойкость футеровки при высоких рабочих температурах расплава и при наличии теплосмен (резких колебаний температуры футеровки при полном сливе металла).

- Однако преимущества тигельных печей перед другими плавильными агрегатами настолько значительны, что они нашли в последние годы чрезвычайно широкое применение в самых разных отраслях промышленности.

Обширный номенклатурный ряд ИТП, их простота и надёжность перед другими типами печей приводит к расширению области использования ИТП в направлении плавки металлов с низким удельным сопротивлением, таких как алюминий, медь и сплавы на их основе. Это объясняется, с одной стороны, общим уменьшением дефицита электроэнергии, а с другой - эксплуатационными преимуществами, которые создаёт плавка в тигельных печах, при плавке алюминия и его сплавов в ИТП отпадает необходимость регулярной чистки тигля. Кроме того, в тигельных печах, можно вести одиночные плавки, что затруднительно для индукционных канальных печей. В некоторых случаях этот довод может являться решающим в пользу применения тигельных печей для плавки цветных металлов.

Увеличение ёмкости и габаритов тигельных печей позволяет успешно переплавлять одновременно крупногабаритную и мелкую твёрдую шихту с

повышенным содержанием примесей. Во многих случаях ИТП могут вести плавку на токе промышленной частоты, благодаря чему отсутствие преобразователей частоты позволяет поднять общий электрический коэффициент полезного действия установки, который может быть больше, чем при применении повышенной частоты. Однако применение ИТП, представленных в номенклатурном ряде с фиксированными характеристиками является не всегда приемлемым для того или иного, промышленного предприятия и требует их уточнения, а в некоторых случаях существенного изменения. Это обусловлено условиями эксплуатации установки, характером шихты, особенностями технологического процесса, улучшением энергетических показателей ИТП.

Поэтому расчет и проектирование ИТП с заданными техническими характеристиками является задачей актуальной.

1 Обзорная часть

1.1 Конструкция печей

Индукционные тигельные печи представляют собой цилиндрический тигель, помещённый в полость соленоида-индуктора, питаемого переменным током. Металлическая шихта, заложенная в тигель, поглощает создаваемые индуктором электромагнитные волны, что и вызывает её нагрев.

Увеличение ёмкости и габаритов тигельных печей позволяет во многих случаях вести плавку на токе промышленной частоты, отказавшись от применения преобразователей частоты, благодаря чему общий электрический к. п. д. установки может быть больше, чем при применении повышенной частоты.

На рисунке 1.1 в качестве примера показана индукционная тигельная печь промышленной частоты для плавки алюминиевых сплавов.

Индукционные тигельные печи имеют в общем случае следующие основные узлы: индуктор - 2, каркас (или кожух) печи - 7, магнитопроводы или электромагнитные экраны - 6, плавильный тигель - 4, крышку с механизмом подъема - 1 и подину, механизм наклона печи - 5, установку подшипников - 3 и рабочую площадку - 8.

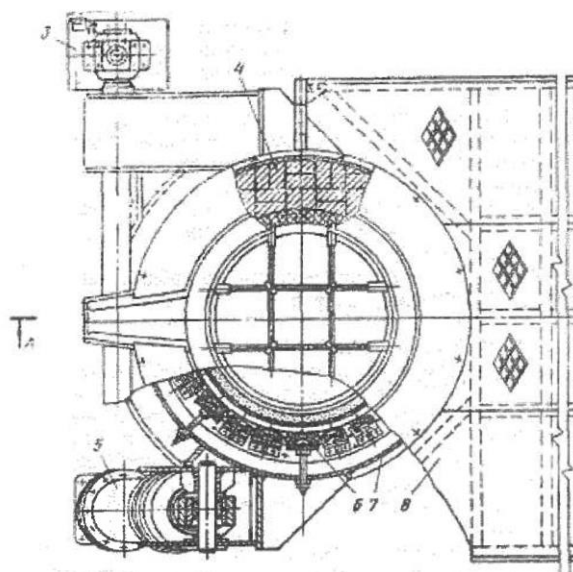
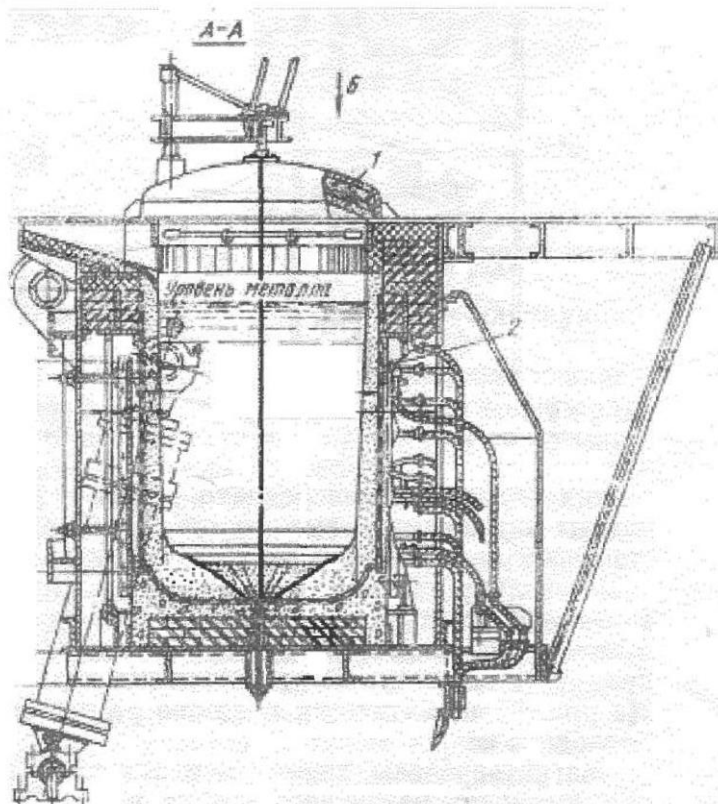


Рисунок 1.1 — Индукционная тигельная печь

1.2 Малогабаритные индукционные печи

В наше время существуют малогабаритные индукционные печи. Они используются для плавки металлов, отжига, закалки небольших деталей. В России существует фирма «АМАЛЬГАМА», изготавливающая такие печи. Она предлагает 2 модели: Модель "АМАЛЬГАМА mini DL-15" и Модель "АМАЛЬГАМА mini DL-25" емкостью 0.1-0.5 и 0.5-2.0 кг для стали, 0.2 и 1.0 кг для алюминия, 1.0-2.0 и 2.0-4.0 кг для меди.

В состав оборудования входит:

1. Высокочастотный блок питания 30-100 кГц.
2. Индукционная катушка.
3. Тигель.
4. Оболочка для тигля. [2]



Рисунок 1.2.1 – Высокочастотная печь "АМАЛЬГАМА mini"

Еще существует компания «Русский индуктор», осуществляющая поставки малогабаритных индукционных печей для плавки цветных и драгоценных металлов с графитовым тиглем, так называемые печи

ювелирные. В наличии имеет множество моделей малых ювелирных печей для золота, серебра, бронзы, меди и олова. [1]



Рисунок 1.2.2 – Печи компании «Русский индуктор»

2 Современные индукционные тигельные печи

За все время использования ИТП основная конструкция печи сильно не изменялась. Имеется тигель, в котором плавятся металлы. На данный момент инженеры стараются увеличить КПД печей, повышение интенсивности перемешивания металла в печи, увеличение коэффициента мощности.

Способом повышения интенсивности перемешивания и увеличения коэффициента мощности в печи является добавление дополнительных конденсаторов один из которых последовательно соединен с основной катушкой и источником питания, образуя основной контур, а другой - подключен к дополнительным катушкам, которые размещены вокруг основной катушки и соединены последовательно и встречно, образуя короткозамкнутый контур, при этом число витков дополнительных катушек и емкости конденсаторов выбраны таким образом, чтобы выполнялось условие резонанса между индуктивно связанными основным и короткозамкнутым контурами (рисунок 2.1) [3].

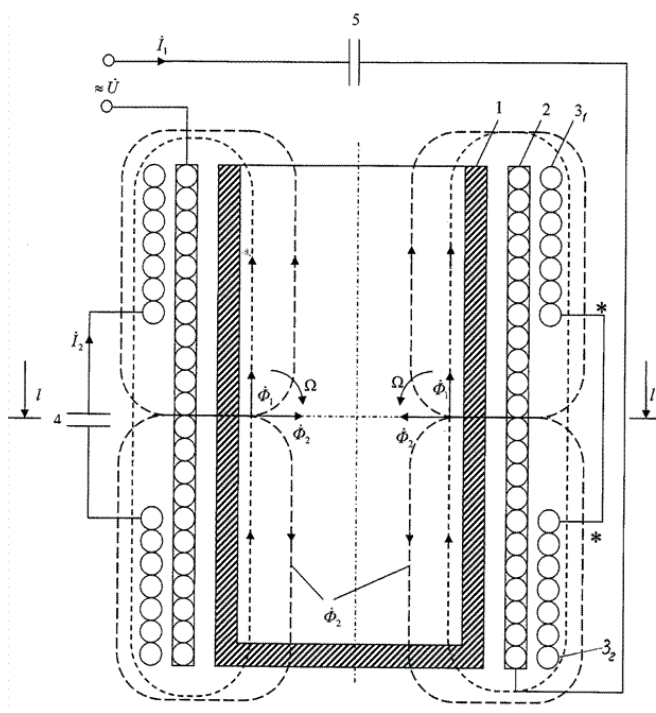


Рисунок 2.1 — Индукционная тигельная печь с 2 конденсаторами

Индукционная тигельная печь содержит тигель 1, основную катушку 2, вокруг которой расположены две дополнительные катушки 31, 32, соединенные последовательно и встречно. Количество витков дополнительных катушек неодинаково. Индукционная тигельная печь содержит два конденсатора 4 и 5. Один из конденсаторов 4 соединен с дополнительными катушками 3_1 , 3_2 так, что образует короткозамкнутый контур. Основная катушка 2 с последовательно соединенным с ней конденсатором 5 подключена к источнику однофазного переменного напряжения (здесь и далее точкой обозначены комплексные величины), образуя основной контур [3].

Существует также электромагнитная тигельная плавильная печь с С-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком (рисунок 2.2). Такая электромагнитная тигельная плавильная печь с С-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком содержит горизонтальный С-образный магнитопровод 1, выполненный заодно с корпусом, огнеупорный тигель 2 с ванной 3, индуктор 4 с витками. Возможно применение устройства 5 для слива расплава из ванны в виде электростали, или гидроцилиндра, или электромеханической передачи. Печь дополнительно оборудована источником регулируемого переменного электрического напряжения с батареей конденсаторов (не показаны). Принцип действия печи следующий - проходящий по виткам индуктора переменный электрический ток, возбужденный э.д.с. источника электроэнергии, создает переменный магнитный поток. При этом электрическая энергия превращается в магнитную согласно закону полного тока по первому уравнению Максвелла. Магнитный поток действует на электропроводные куски шихты и в каждом из них индуцируется непосредственно переменное вихревое электрическое поле и э.д.с, а под

действием этой э.д.с. - вихревой ток Фуко. При этом магнитная энергия превращается согласно закону электромагнитной индукции Фарадея по второму уравнению Максвелла вновь в электрическую, которая согласно закону Джоуля-Ленца превращается в тепловую, нагревая расплав. Таким образом, печь построена на других принципах превращения энергии: электрическая от э.д.с. источника - магнитная - электрическая вихревого тока Фуко - тепловая. Поскольку рабочий магнитный поток создается только индуктором, печь является индукторной индукционной. Эта конструкция позволяет снизить потери от износа тигля и брака отливок по неметаллическим включениям и энергоемкости процесса плавки, уменьшить габариты установки, а также повысить защищенность и надежность индукционной тигельной печи [4].

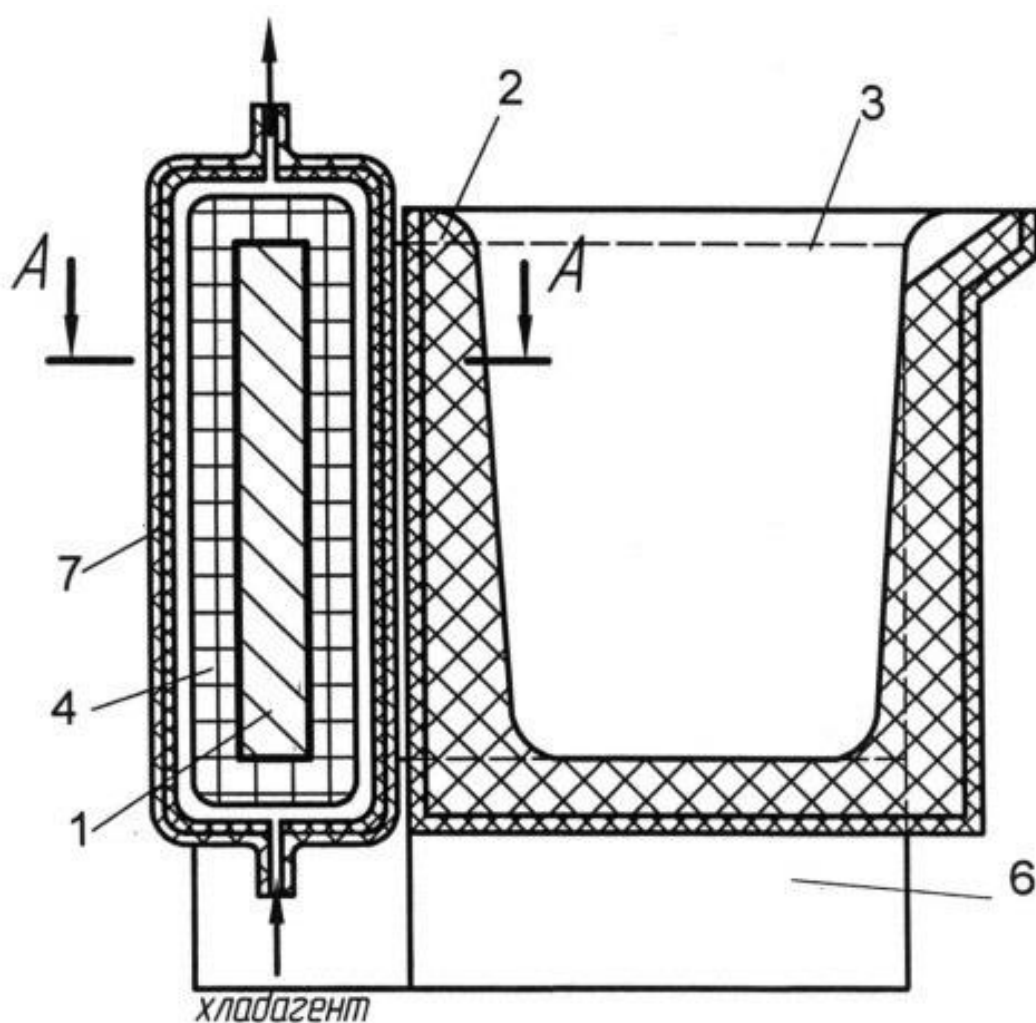


Рисунок 2.2 — Электромагнитная тигельная плавильная печь с С-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком

Также существуют турбоиндукционные тигельные печи. Такие печи относятся к комплексному оборудованию для плавки шихты, содержащей цветные и черные металлы. На рисунке 2.3 показано конструктивное исполнение предлагаемой турбоиндукционной печи. Разрез печи в вертикальной плоскости представлен на рисунке 2.3, на котором обозначено: 1 - подина; 2 - цилиндрическая часть тигля; 3 - т-фазный индуктор; 4 - Г-образные магнитопроводы; 5 - устройство управляемого слива металла; 6 - шиберная заслонка; 7 - чашеобразная часть тигля; 8 - теплоизолирующая крышка; 9 - механизм перемещения крышки; 10 - шлак; 11 - расплав металла; 12 - сливной носок; 13 - основной вал вращения тигля; 14 - корпус печи; 15 - гидравлические цилиндры; 16 - обмотки электромагнитного вращателя; 17 - шунтирующие магнитопроводы; 18 - загрузочная площадка. Принцип действия: в циклическом режиме печь работает аналогично ИТП классического исполнения. Вначале через горловину печи при открытой крышке (8) производится завал шихты. После этого подается питание на т-фазный индуктор (3) и шихта расплавляется. По мере наплавления жидкого металла в цилиндрической части тигля (2) создается одноконтурное движение металла, так как при многофазном питании индуктора создаются тяговые усилия, направленные вверх вдоль стенок тигля. Когда металл наполняет чашеобразную часть тигля, включается электромагнитное вращающее устройство, образованное Г-образными магнитопроводами (4) и шунтирующими магнитопроводами (17) с обмотками (16). При этом верхние слои ванны расплава начинают вращаться в чаше тигля большого диаметра и поверхность расплава приобретает вогнутую форму (отрицательный мениск). В

образовавшуюся лунку скатывается шлак и загружается мелкая шихта, а также подаются мелкая шихта и легирующие добавки. За счет вращательного движения в верхней части ванны расплава создаются высокие скорости движения металла в чаше тигля при относительно низком гидростатическом давлении на его стенки, что позволяет уменьшить размывание футеровки и увеличить срок ее службы. Высокая скорость движения металла под шлаком на большой поверхности в тигля способствует ускорению химических реакций и активизации металлургического процесса. Под действием центробежных сил жидкий металл втягивается в цилиндрическую часть тигля и попадает в циркулирующий там поток металла. Таким образом, создается общая циркуляция металла в рабочем объеме тигля: в чашеобразной части - вращающийся поток; в центре цилиндрической части - ниспадающий поток; вдоль стенок цилиндрической части - восходящий поток. При этом скорость движения металла вдоль стенок в части тигля оказывается невысокой, следовательно, и размывание футеровки становится значительно меньше. Интенсивная циркуляция металла по объему тигля обеспечивает высокую равномерность распределения температуры и химического состава. В конце плавки производится полный поворот печи вокруг основного вала под действием гидравлических цилиндров (15) при открытых полуцилиндрических защелках и металл сливается в промежуточный ковш. Изобретение позволяет повысить технико-экономическую эффективность печей с осевым вращением металла и создать многофункциональный плавильный агрегат, способный перерабатывать полиметаллическую шихту, содержащую оксиды, в циклическом, непрерывном и полунепрерывном режимах работы [5].

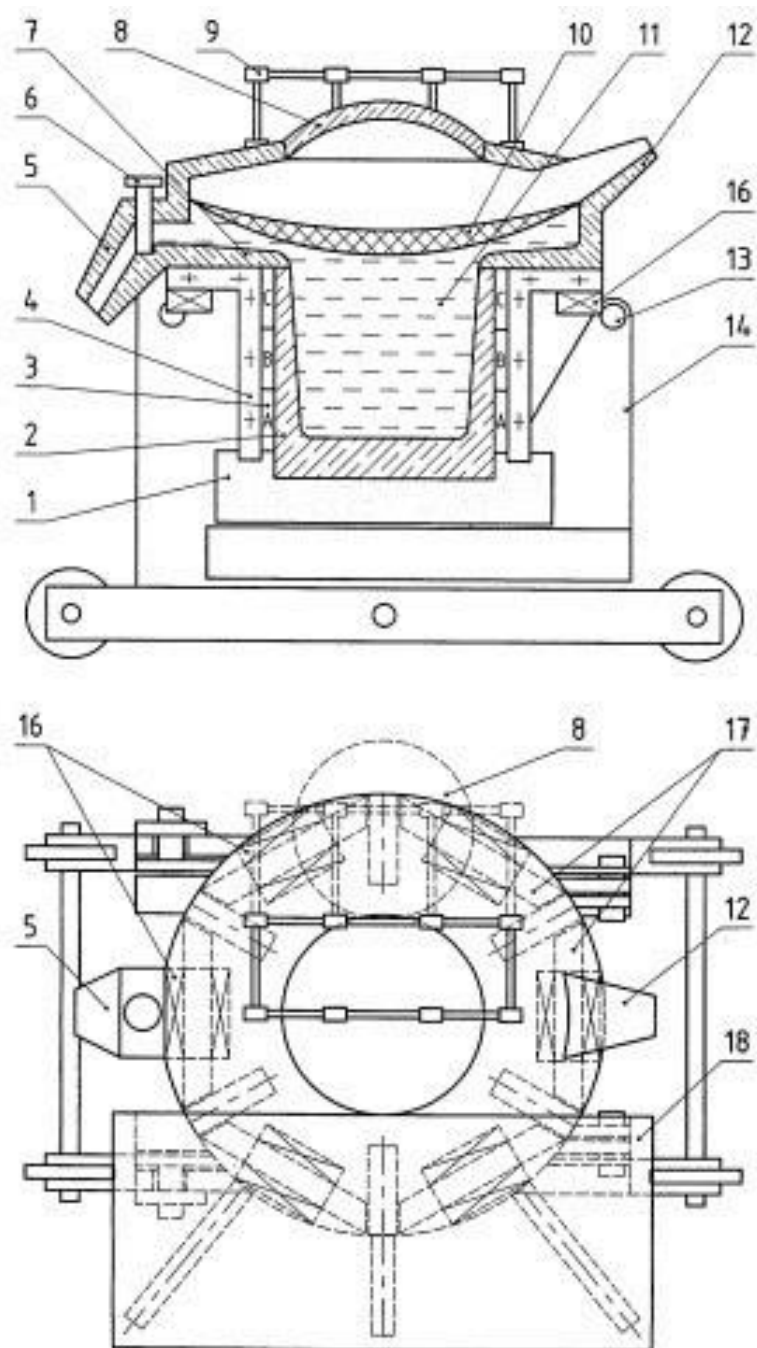


Рисунок 2.3 — Турбоиндукционная тигельная печь

Существуют плавильные печи с холодным тиглем (рисунок 2.4). Известен способ плавки металла в индукционной печи с холодным тиглем, при котором загрузка размещается на неподвижном поддоне, являющимся элементом конструкции холодного тигля. Затем расплавленный металл сливается из тигля или затвердевает в тигле на слиток. Основным недостатком этого способа является наличие зоны

непроплава в центре над поддон, т.к. электромагнитное поле индуктора в этой зоне практически равно нулю, т.к. поддон в этом месте экранирует загрузку и расплавить ее полностью невозможно. Такие печи используются для производства высококачественных легированных сталей и сплавов специальных марок, используемых, в частности, при изготовлении оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, лезвийного хирургического инструмента и др. [6, 8].

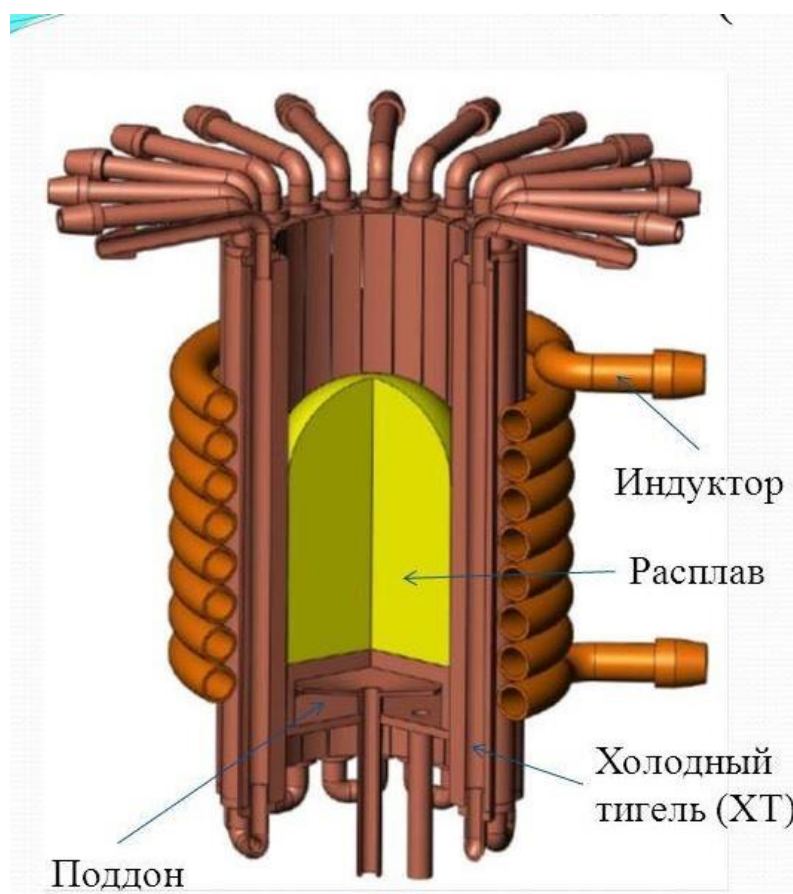


Рисунок 2.4 — Индукционная печь с холодным тиглем

3 Расчет по инженерной методике

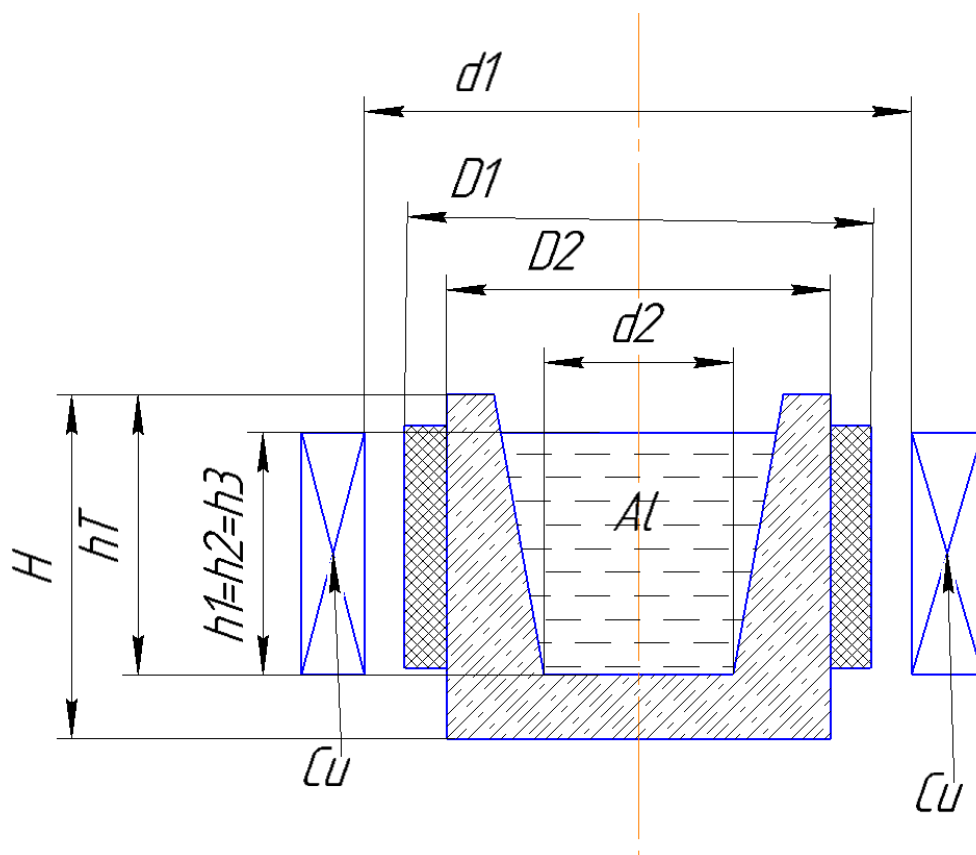


Рисунок 3.1 — Эскиз к геометрическому расчету тигельной печи

Ниже в таблицу занесены исходные данные для выполнения инженерного расчета

Таблица 3.1 — исходные данные

Исходные данные	
U, В — напряжение сети	380
d2, м — внутренний диаметр тигля	0,015
h2, м — высота расплава в тигле	0.03
tпроц, с — время нагрева до расплавления	90
γ_2 , кг/м ³ — плотность расплава	2380

алюминия	
$T_{пл}$, °C — температура плавления алюминия	730
ρ_1 Ом × м — удельное электрическое сопротивление меди	2×10^{-8}
ρ_2 , М×М — удельное электрическое сопротивление расплава	$2,7 \times 10^{-8}$

3.1 Определение геометрических соотношений в системе «индуктор-загрузка»

Номинальная ёмкость тигля, кг:

$$G_H = \rho_2 \times \frac{\pi \times d_2^2 \times h_2}{4} = 0,014.$$

(3.1.1)

Полезный объем тигля, м³:

$$V = \frac{G_H}{\gamma_2} = 6 \times 10^{-6}, \quad (3.1.2)$$

где $\gamma_2 = 2380$ — плотность расплава алюминия, кг/м³.

Высота расплава в тигле, м:

$$h_3 = d_2 \times h_2 = 0,03. \quad (3.1.3)$$

Высота внутренней полости тигля, м:

$$h_T = 1.3 \times h_2 = 0,039, \quad (3.1.4)$$

где 1,3 — коэффициент, учитывающий наличие мениска металла.

Толщину футеровки тигля возьмем, м:

$$b_{\phi} = 0,015.$$

Внутренний диаметр индуктора, м:

$$d_1 = d_2 + 2b_{\phi} + 2b_{из} = 0,047, \quad (3.1.5)$$

где $b_{из} = 0,001$ — толщина тепловой изоляции индуктора, м.

Высота индуктора (без учета холостых витков), м:

$$h_1 = h_2 \times h'_1 = 0,03, \quad (3.1.6)$$

где $h'_1 = 1$ — относительная высота индуктора.

3.2 Выбор частоты источника питания и определения высоты мениска металла

Необходимая частота тока определяется двумя факторами: электрическим КПД индуктора и уровнем циркуляции металла в тигле. Чем выше частота, тем выше КПД индуктора и ниже скорость циркуляции.

Скорость циркуляции при прочих равных условиях пропорциональна $\frac{1}{f}$.

Электрический КПД индуктора вначале быстро растёт с увеличением f ,

однако при достижении f_{\min} КПД меняется мало. Поэтому на практике нижний предел частоты определяется из выражения:

$$f \geq \frac{\pi \times 10^6 \times \rho_2}{\mu_r \times d_2^2} = 377. \quad (3.2.1)$$

Возьмем ближайшую к этому значению частоту источника питания, Гц:

$$f = 400.$$

Удельная мощность, Вт/м²:

$$p_0 = \frac{P_2}{2\pi \times r_2 \times h_2} = 1,54 \times 10^5, \quad (3.2.2)$$

где $P_2 = 217$ активная мощность, подводимая к нагрузке, Вт.

$r_2 = 7,5 \times 10^{-3}$ — средний радиус тигля, м.

Электродинамическое давление на оси тигля, Па:

$$p_{сж} = \frac{2 \times \pi \times 10^{-7} \times p_0}{\sqrt{\rho_2 \times f}} = 29,4. \quad (3.2.3)$$

Высота мениска, м:

$$h_m = \frac{p_{сж}}{9,81 \times \gamma_2} = 1,26 \times 10^{-3}. \quad (3.2.4)$$

3.3 Определение активной мощности и теплового КПД

Полезная мощность, необходимая для нагрева загрузки до температуры разливки, Вт:

$$P_{\text{пол}} = \frac{(c \times T_{\text{пл}} + \lambda) \times G_{\text{н}}}{t_{\text{проц}}} = 167, \quad (3.3.1)$$

где $c=903$ — удельная теплоемкость загрузки, Дж/кг·с;

$T_{\text{пл}}=730$ — температура плавления алюминия, °С;

$\lambda=390000$ — скрытая теплота плавления, Дж/кг.

Тепловые потери от расплава, Вт:

$$P_{\text{пт}} = 0,3 \times P_{\text{пол}} = 50. \quad (3.3.2)$$

Активная мощность, которая должна подводиться к загрузке, чтобы обеспечить требуемую производительность, Вт:

$$P_2 = P_{\text{пол}} + P_{\text{пт}} = 217,7. \quad (3.3.3)$$

Тепловой коэффициент полезного действия печи:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_2} = 0,769. \quad (3.3.4)$$

Удельная мощность, Вт/кг:

$$P_{уд} = \frac{P_2}{\eta_T \times \eta_o \times G_H} = 3,94 \times 10^4. \quad (3.3.5)$$

3.4 Тепловой расчет индукционной тигельной печи

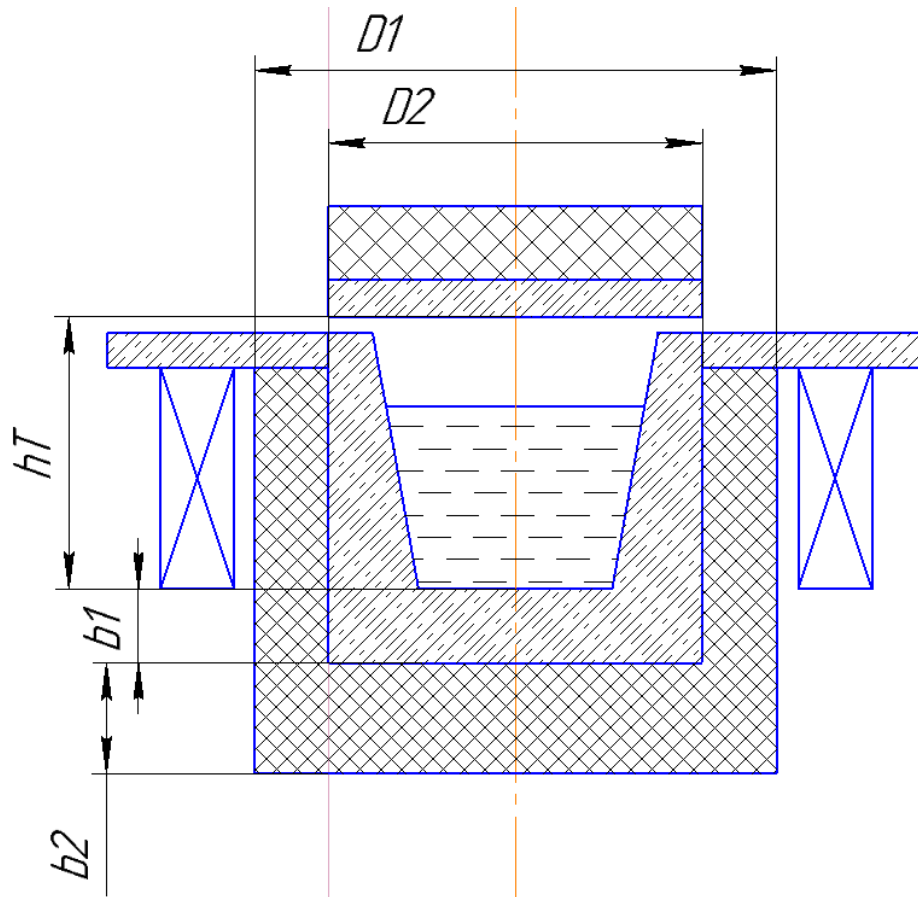


Рисунок 3.2 — Эскиз футеровки

Задачей расчета является определение температуры наружной поверхности футеровки, расчет тепловых потерь и теплового коэффициента полезного действия печи.

Расчет тепловых потерь ведут отдельно для следующих элементов: боковой поверхности тигля, подины, крышки, потери измерением через открытый проем.

Расчет тепловых потерь через боковую поверхность тигля. Пусть боковая поверхность тигля состоит из трех слоев: огнеупорный бетон, шамот легковесный ШЛ-1, асбест.

Для определения теплопроводностей зададим значения температур на границах слоев, °C:

$$T_1=730, T_2=80, T_3=20.$$

Исходя из этих значений, определяем средние значения температур, °C:

$$T_{1cp} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 405; \quad (3.4.1)$$

$$T_{2cp} = \frac{T_2 + T_3}{2} = 50. \quad (3.4.2)$$

Находим теплопроводности слоев футеровки, Вт/м·°C:

$$\lambda_{бет} = 2 - 0,65 \times 10^{-3} \times T_{1cp} = 1,737; \quad (3.4.3)$$

$$\lambda_{асб} = 0,13 + 0,26 \times 10^{-3} \times T_{2cp} = 0,143. \quad (3.4.4)$$

Определяем тепловые потери через боковую поверхность, Вт:

$$P_{т.б.} = \frac{T - T_{окр}}{\frac{1}{2\pi \times \lambda_{бет} \times H} \ln \frac{D_1}{D} + \frac{1}{2\pi \times \lambda_{асб} \times H} \ln \frac{D_2}{D_1}} = 40,513, \quad (3.4.5)$$

где $T=730$ — температура внутренней поверхности стенки, К;

$T_{\text{окр}}=20$ — температура внешней поверхности стенки, К;

$D_2=0,025$ — наружный диаметр слоя огнеупорного бетона, м;

$D_1=0,045$ — наружный диаметр слоя асбеста, м;

$D=0,015$ — средний диаметр садки, м;

$H=0,04$ — высота стенки, м.

Тепловые потери излучением с зеркала ванны, Вт:

$$P_{\text{изл}} = \varepsilon \times c_0 \times \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right] \times \frac{\pi D^2}{4} \times \xi = 0,429, \quad (3.4.6)$$

где $\varepsilon=0,3$ — степень черноты расплава;

$c_0=5,7$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\xi=0,5$ — коэффициент диафрагмирования.

Определяем тепловые потери подины печи.

Поверхности слоёв, м^2 :

$$F_1 = \frac{\pi \times D^2}{4} = 1,767 \times 10^{-4}; \quad (3.4.7)$$

$$F_2 = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = 4,909 \times 10^{-4}; \quad (3.4.8)$$

$$F_3 = \frac{\pi \times D_2^2}{4} = 1,59 \times 10^{-3}. \quad (3.4.9)$$

Находим средние значения поверхностей слоёв, м²:

$$F_{\text{1cp}} = \frac{F_1 + F_2}{2} = 3,338 \times 10^{-4}; \quad (3.4.10)$$

$$F_{\text{2cp}} = \frac{F_2 + F_3}{2} = 1,041 \times 10^{-3}. \quad (3.4.11)$$

Для определения теплопроводностей зададим значения температур на границах слоев, °C:

$$T_1 = 730, T_2 = 80, T_3 = 20.$$

Исходя из этих значений, определяем средние значения температур, °C:

$$T_{\text{1cp}} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 405; \quad (3.4.12)$$

$$T_{\text{2cp}} = \frac{T_2 + T_3}{2} = 50. \quad (3.4.13)$$

Находим теплопроводности слоев футеровки, Вт/м·°C:

$$\lambda_{\text{бет}} = 2 - 0,65 \times 10^{-3} \times T_{\text{1cp}} = 1,7; \quad (3.4.14)$$

$$\lambda_{\text{асб}} = 0,13 + 0,26 \times 10^{-3} \times T_{\text{2cp}} = 0,143. \quad (3.4.15)$$

Определяем тепловые потери через подину печи, Вт:

$$P_{\text{т.п.}} = \frac{T - T_{\text{окр}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} \times F_1} + \frac{b_1}{\lambda_{\text{бет}} \times F_{1\text{ср}}} + \frac{b_2}{\lambda_{\text{асб}} \times F_{1\text{ср}}}} = 0,829 ,$$

(3.4.16)

где $T=730$ — температура внутренней поверхности стенки, К;

$T_{\text{окр}}=20$ — температура внешней поверхности стенки, К;

$\alpha_{\text{вн}}=10$ — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С;

$b_1=0,005$ — толщина слоя огнеупорного бетона, м;

$b_2=0,01$ — толщина слоя асбеста, м.

Определяем тепловые потери через крышку. Крышка состоит из двух слоев: огнеупорный бетон и асбест.

Для определения теплопроводностей зададим значения температур на границах слоев, °С:

$$T_1=730, T_2=80, T_3=20.$$

Исходя из этих значений, определяем средние значения температур, °С:

$$T_{1\text{ср}} = \frac{T_1 + T_2}{2} = 450 ;$$

(3.4.17)

$$T_{2\text{ср}} = \frac{T_2 + T_3}{2} = 50 . \quad (3.4.18)$$

Находим теплопроводности слоев футеровки, Вт/м·°С:

$$\lambda_{\text{бет}} = 2 - 0,65 \times 10^{-3} \times T_{1\text{cp}} = 1,7;$$

(3.4.19)

$$\lambda_{\text{асб}} = 0,13 + 0,26 \times 10^{-3} \times T_{2\text{cp}} = 0,14.$$

(3.4.20)

Определяем тепловые потери через крышку печи, Вт:

$$P_{\text{т.к.}} = \frac{T - T_{\text{окр}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} \times F_1} + \frac{b_1}{\lambda_{\text{бет}} \times F_{1\text{cp}}} + \frac{b_2}{\lambda_{\text{асб}} \times F_{2\text{cp}}}} = 1,106,$$

(3.4.21)

где $T = 730$ — температура внутренней поверхности стенки, К;

$T_{\text{окр}} = 20$ — температура внешней поверхности стенки, К;

$\alpha_{\text{вн}} = 10$ — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С;

$b_1 = 0,005$ — толщина слоя огнеупорного бетона, м;

$b_2 = 0,01$ — толщина слоя асбеста, м.

Суммарные тепловые потери печи, Вт:

$$P_{\text{п.т.}} = P_{\text{т.б.}} + P_{\text{изл}} + P_{\text{т.п.}} + P_{\text{т.к.}} = 42,8.$$

(3.4.22)

Уточним активную мощность, подводимую к загрузке P_2 , Вт:

$$P_2 = P_{\text{пол}} + P_{\text{п.т.}} = 210,3.$$

(3.4.23)

3.5 Электрический расчет печи для горячего режима

Глубина проникновения тока в материал индуктора, м:

$$\Delta_1 = 503 \sqrt{\frac{\rho_1}{f}} = 3,5 \times 10^{-3}. \quad (3.5.1)$$

Глубина проникновения тока в материал загрузки, м:

$$\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_{r2} \times f}} = 4,1 \times 10^{-3}, \quad (3.5.2)$$

где $\mu_{r2}=1$ — относительная магнитная проницаемость материала загрузки для горячего состояния.

Относительный радиус загрузки (поперечный размер):

$$\bar{R}_2 = \frac{d_2}{\sqrt{2} \times \Delta_2} = 2,5. \quad (3.5.3)$$

Активное сопротивление индуктора при условии, что толщина внутренней стенки трубки индуктора $b_1 \geq \Delta_1$, Ом:

$$r_1 = \rho_1 \frac{\pi d_{1p}^2}{\Delta_1 \times h_1 \times k_3} = 1,7 \times 10^{-6}, \quad (3.5.4)$$

где $k_3=0.85$ — коэффициент заполнения индуктора;

$$d_{1p} = d_1 + \Delta_1 = 0,051, \quad (3.5.5)$$

где $d_1=0,047$ — внутренний диаметр индуктора, м.

Активное сопротивление загрузки, Ом/виток:

$$r_2 = \rho_2 \frac{\pi d_2}{2 \times \Delta_2^2 h_2} \times A = 1,242 \times 10^{-4},$$

(3.5.6)

где $A=0,1$ вспомогательная функция.

Внутреннее реактивное сопротивление индуктора:

$$x_{1b} = r_1 \times \operatorname{tg} \psi = 1,7 \times 10^{-6},$$

(3.5.7)

где $\operatorname{tg} \psi = 1$ — сдвиг фаз между напряженностями электрического и магнитного полей в металле индуктора.

$$x_{1b} \approx r_1.$$

Внутреннее реактивное сопротивление загрузки, Ом/виток²:

$$x_2 = \rho_2 \frac{\pi d_2^2}{2 \times \Delta_2^2 h_2} \times B = 1,8 \times 10^{-5},$$

(3.5.8)

где $B=1$ — вспомогательная функция.

Реактивное сопротивление рассеяния, Ом/виток²:

$$x_s = \omega \times \pi^2 \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{h_2} \times 10^{-7} = 1,64 \times 10^{-4},$$

(3.5.9)

где $\omega = 2\pi f = 2,5 \times 10^3$ — циклическая частота питающего индуктор напряжения, с^{-1} .

Реактивное сопротивление пустого индуктора, Ом/виток²:

$$x_1 = \omega \times \pi^2 \frac{(d_1^2 - d_2^2)}{h_2} \times 10^{-7} \times k = 1,3 \times 10^{-4},$$

(3.5.10)

где $k = 0,8$ — поправочный коэффициент, учитывающий концевые эффекты короткого индуктора.

Реактивное сопротивление обратного замыкания, Ом/виток²:

$$x_0 = x_i \frac{h_1}{(h_1 - k \times h_2)} = 6,5 \times 10^{-4}.$$

(3.5.11)

Коэффициент приведения параметров:

$$c = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_s + x_2}{x_0}\right)^2} = 0,6.$$

(3.5.12)

Приведение активного сопротивления загрузки, Ом/виток²:

$$r_2' = cr_2 = 7,4 \times 10^{-5}.$$

(3.5.13)

Приведенное реактивное сопротивление, Ом/виток²:

$$x_2' = c \left[x_s + x_2 + \frac{(x_s + x_2)^2 + r_2^2}{x_0} \right]^2 = 2,2 \times 10^{-4}.$$

(3.5.14)

Эквивалентное активное сопротивление индуктора, Ом/виток²:

$$r = r_1 + r_2' = 7,6 \times 10^{-5}. \quad (3.5.15)$$

Эквивалентное реактивное сопротивление, Ом/виток²:

$$x = x_{lv} + x_2' = 2,2 \times 10^{-4}.$$

(3.5.16)

Эквивалентное полное сопротивление индуктора, Ом/виток²:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = 2,3 \times 10^{-4}. \quad (3.5.17)$$

Уточненное значение электрического коэффициента полезного действия индуктора:

$$\eta_3 = \frac{r_2'}{r} = 0,97.$$

(3.5.18)

Коэффициент мощности индуктора:

$$\cos \varphi_u = \frac{r}{Z} = 0,322. \quad (3.5.19)$$

Активная мощность индуктора, кВт:

$$P_u = \frac{P_2}{\eta_3} = 215,4.$$

(3.5.20)

Возьмем число витков равное пяти.

$$W = 5.$$

На индуктор через трансформатор поступает U_1 , В:

$$U_1 = 5,5.$$

Напряжение на одном витке индуктора, В/виток²:

$$U_u' = \frac{U_1}{W} = 1,1. \quad (3.5.21)$$

Ток в нагрузке, А·виток:

$$I_1' = \frac{U_u'}{Z} = 4660.$$

(3.5.22)

Активное, реактивное и полное сопротивления системы индуктор – нагрузка, Ом:

$$r_u = r \times W^2 = 1,9 \times 10^{-3};$$

(3.5.23)

$$x_u = x \times W^2 = 5,6 \times 10^{-3};$$

(3.5.24)

$$z_u = z \times W^2 = 5,9 \times 10^{-3}.$$

(3.5.25)

Ток индуктора, А:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_u} = 932.$$

(3.5.26)

Линейная плотность тока в индукторе, А/м:

$$I_1' = \frac{I_1 \times W}{h_1} = 1,5 \times 10^5$$

(3.5.27)

Высота витка, м:

$$h_b = \frac{h_1}{W} k_3 = 5 \times 10^{-3},$$

(3.5.23)

где $k_3 = 0,85$ — коэффициент заполнения.

3.6 Расчет параметров индуктора при плавлении кусковой шихты

Кусковая шихта, в первом приближении может быть представлена в виде совокупности эквивалентных цилиндров, расположенных вертикально в тигле. Причем диаметр цилиндров численно равен характерному размеру среднего куска шихты $d_{ш}$, а высота их равна расчетной высоте загрузки h_2' . Предполагается, что электрический контакт между отдельными эквивалентными цилиндрами отсутствует.

Число эквивалентных цилиндров, имитирующих шихту и размещающихся в плавильном тигле диаметром d_2 приближенно можно определить из выражения:

$$N_{ц} = \frac{\pi d_2^2}{4 d_{ш}^2} = 44,179. \quad (3.6.1)$$

Глубина проникновения тока в шихту, м:

$$\Delta_{ш} = 503 \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{\mu_{ш} f}} = 7,8 \times 10^{-4},$$

(3.6.2)

где $\mu_{\text{ш}}'=27,5$ — относительное значение магнитной проницаемости шихты в начальной стадии плавки.

Относительный радиус эквивалентного единичного цилиндра, м:

$$\bar{R}_{\text{ш}} = \frac{d_{\text{ш}}}{\sqrt{2}\Delta_{\text{ш}}} = 1,8.$$

(3.6.3)

Активное сопротивление всей кусковой шихты, Ом/виток²:

При $\mu_{\text{ш}}'=1$:

$$r_{\text{ш}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{d_2^2}{\Delta_2^2 h_2} \rho_{\text{ш}} N_{\text{ц}} \psi_a' = 5,2 \times 10^{-7}.$$

(3.6.4)

При $\mu_{\text{ш}}' > 1$:

$$r_{\text{ш}} = 0,97 \frac{\pi d_{\text{ш}}^2}{\Delta_{\text{ш}}^2 h_2} \rho_{\text{ш}} N_{\text{ц}} \psi_a' = 3,5 \times 10^{-7},$$

(3.6.5)

где ψ_a' и $\psi_a''=0,03$ — значения вспомогательной функции ψ_a (для соответствующего $\bar{R}_{\text{ш}}$).

Внутреннее реактивное сопротивление шихты $x_{\text{ш.в}}$, Ом/виток²:

При $\mu_{\text{ш}}'=1$:

$$x_{ш.в} = \frac{r_{ш} \psi_p'}{\psi_a'} = 1,4 \times 10^{-5}.$$

(3.6.6)

При $\mu_{ш}' > 1$:

$$x_{ш.в} = 0,71 \times r_{ш} = 2,5 \times 10^{-7},$$

(3.6.7)

где $\psi_p' = 0,8$

Реактивное сопротивление воздушного зазора, Ом/виток²:

$$x_3 = \frac{2\pi}{h_2'} f \left(d_1^2 - \frac{\pi}{4} d_2^2 \right) \times 10^{-7} = 2,5 \times 10^{-7}.$$

(3.6.8)

Реактивное сопротивление обратного замыкания определяется по формуле:

$$x_0 = x_1 \frac{h_1}{h_1 - k h_2} = 6,5 \times 10^{-4}. \quad (3.6.9)$$

Коэффициент приведения параметров шихты к силе тока индуктора:

$$c_{пр} = \frac{1}{\left(\frac{r_{ш}}{x_0} \right)^2 + \left(1 + \frac{x_{ш.в} + x_3}{x_0} \right)^2} = 0,998.$$

(3.6.10)

Приведенное активное и реактивное сопротивление шихты, Ом/виток²:

$$r'_{ш} = c_{пр} \times r_{ш} = 0,998; \quad (3.6.11)$$

$$x'_{ш} = c_{пр} \left[x_{ш.в} + x_3 + \frac{(x_{ш.в} + x_3)^2 + r_{ш}^2}{x_0} \right]^2 = 5 \times 10^{-7}. \quad (3.6.12)$$

Эквивалентное активное, реактивное и полное сопротивления индуктора с шихтой, Ом/виток²:

$$r_3 = r_1 + r'_{ш} = 0,998; \quad (3.6.13)$$

$$x_3 = x_{1в} + x'_{ш} = 2,3 \times 10^{-6}; \quad (3.6.14)$$

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2} = 0,998. \quad (3.6.15)$$

Сила тока в индукторе в режиме плавки шихты, А:

$$I_1 = \frac{U_1}{z_3 \times W^2} = 0,22. \quad (3.6.16)$$

Напряженность магнитного поля у поверхности загрузки, А/м:

$$H_0 = I_1 W \sqrt{\frac{c_{np}}{h_1}} = 6,35.$$

(3.6.17)

3.7 Расчет магнитопровода печи

Индукционные печи промышленной частоты снабжаются магнитопроводом, установленным непосредственно за индуктором и выполненным из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 или 0,35 мм.

Индукционные печи повышенной частоты также могут выполняться с магнитопроводами. При этом необходимо использовать сталь толщиной 0,35 или 0,2 мм.

С целью упрощения конструкции магнитопровод обычно набирают из отдельных шихтованных пакетов прямоугольной формы, а расчет магнитопровода сводится к определению его сечения и электрических потерь в стали.

Магнитный поток индуктора, Вб:

$$\Phi = \frac{U_1}{4.44 \times f \times W} = 6,2 \times 10^{-4}.$$

(3.7.1)

Поток замыкающийся через магнитопровод, Вб:

$$\Phi_M = k_M \times \Phi = 5,9 \times 10^{-4},$$

(3.7.2)

где $k_M=0,95$ — коэффициент рассеяния магнитного потока, зависящий от высоты пакета магнитопровода h_M диаметра внутренней образующей магнитопровода d_M . Он может находиться в пределах от 0.25 до 0.95.

Площадь сечения стали магнитопровода, m^2 :

$$S_M = \frac{\Phi_M}{B_M} = 5,9 \times 10^{-4},$$

(3.7.3)

где $B_M=1$ Тл — для горячекатаной стали при частоте 400 Гц и толщине листа 0,2 мм.

Примем число пакетов магнитопровода n_M равным:

$$n_M=4,$$

где $d_n=0,055$ — толщина пакета, м.

Активная площадь сечения стали одного пакета, m^2 :

$$S_{M1} = \frac{S_M}{n_M} = 1,4 \times 10^{-4}.$$

(3.7.4)

Площадь сечения стали одного пакета, m^2 :

$$S_n = \frac{S_{M1}}{k_3} = 1,5 \times 10^{-4}, \quad (3.7.5)$$

где $k_3=0,95$ — коэффициент заполнения пакета сталью, находящийся в пределах от 0,9 до 1.

Электрические потери в пакете магнитопровода, Вт:

$$P_{n.m}=S_n \times h_M \times \gamma_c \times p_c = 0,061, \quad (3.7.6)$$

где $h_M=0,04$ — высота пакета магнитопровода, м;

$\gamma_c=7550$ — плотность стали, кг/м³;

$p_c=1,3$ — удельные потери в стали, кг/м.

Потери на единицу боковой поверхности пакета:

$$P_{n.l} = \frac{P_{n.m}}{2h_M (b_n + d_n)} = 9,2, \quad (3.7.7)$$

где $b_n=0,028$ — ширина одного пакета, м.

Эти величины принимаются конструктивно исходя из соотношения:

$$b_n = 0.5d_n = 0,028. \quad (3.7.8)$$

Суммарная мощность потерь в магнитопроводе:

$$P_M = P_{n.m} \times n_M \times k_g = 0,365, \quad (3.7.9)$$

где $k_g=1,5$ — коэффициент дополнительных потерь, обусловленных неоднородностью поля и дефектами изготовления магнитопровода.

Масса магнитопровода, кг:

$$G_M = S_M \times h_M \times \gamma_c = 0,18. \quad (3.7.10)$$

Результаты расчета занесены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 — итоговые данные

Геометрические параметры	
G_H , номинальная ёмкость тигля, кг	0,014
G_M , масса магнитопровода, кг	0,18
V , полезный объем тигля, м ³	6×10^{-6} 6.2×10^{-4}
h_3 , высота расплава в тигле, м	0,03
h_T , высота внутренней полости тигля, м	0,039
b_f , толщина футеровки тигля, м	0,015
d_1 , Внутренний диаметр индуктора, м	0,047
h_1 , высота индуктора (без учета холостых витков), м	0,03
W , число витков	5
H , высота стенки, м	0,04
Материалы и их свойства (футеровка)	
$\lambda_{бет}$, теплопроводность бетона, Вт/м·°C	1,737
$\lambda_{асб}$, теплопроводность асбеста, Вт/м·°C	0,143
D , средний диаметр садки, м	0,015
D_1 , наружный диаметр асбеста, м	0,045
D_2 , наружный диаметр бетона, м	0,025

Энергетические параметры	
F, частота, Гц	400
I ₁ , ток индуктора, А	932
I' ₁ , ток в нагрузке, А·виток	4660
U ₁ , напряжение на индукторе, В/виток ²	5,5
U' _u , напряжение на одном витке индуктора, В/виток ²	1,1
cosφ _u , коэффициент мощности индуктора	0,322
P _u , активная мощность индуктора, кВт	215,4
P ₂ , активная мощность, подводимая к нагрузке, Вт	217,7
P _{уд} , удельная мощность, Вт/кг	3940000
η _т , тепловой КПД	0,769
η _э , электрический КПД	0,97
Φ, магнитный поток индуктора, Вб	6.2×10 ⁻⁴

4 Численный расчет

Используя результаты инженерного расчета была построена численная модель системы индуктор-заготовка в программе Ansys. Система производит численный расчет на основе системы уравнений Максвелла. В результате расчета получили следующие результаты.

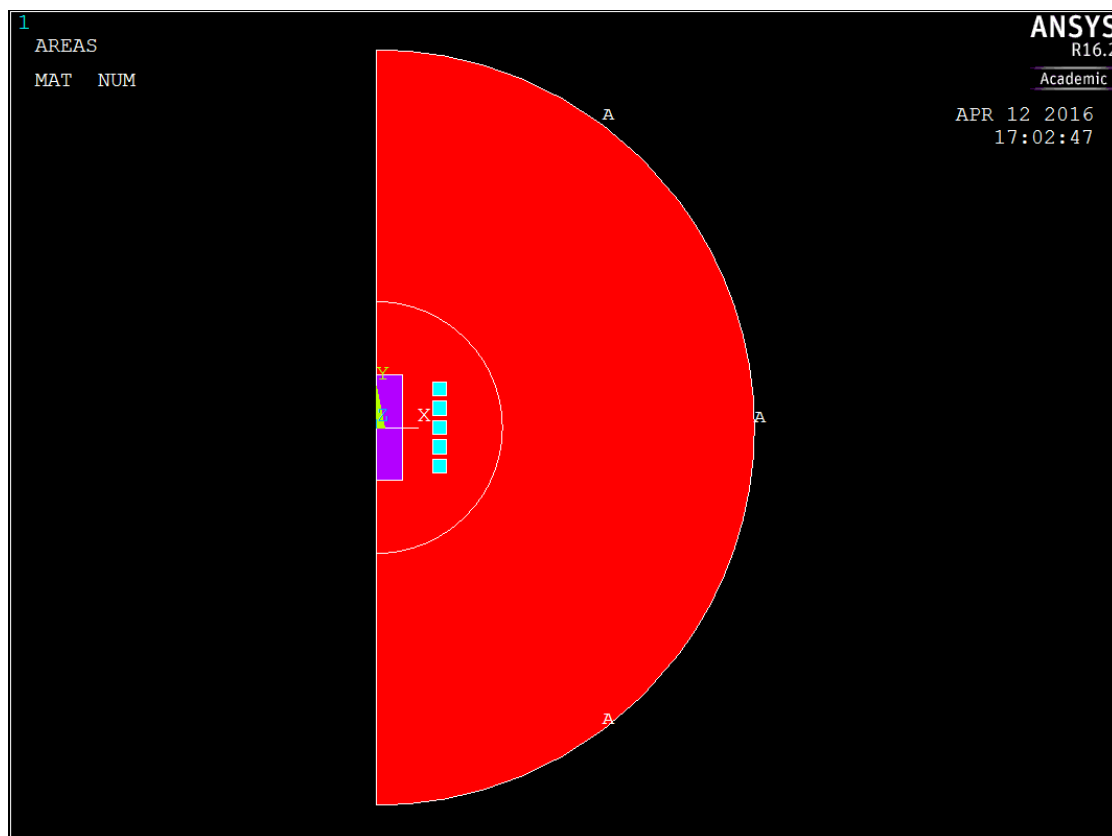


Рисунок 4.1 — Геометрия численной модели

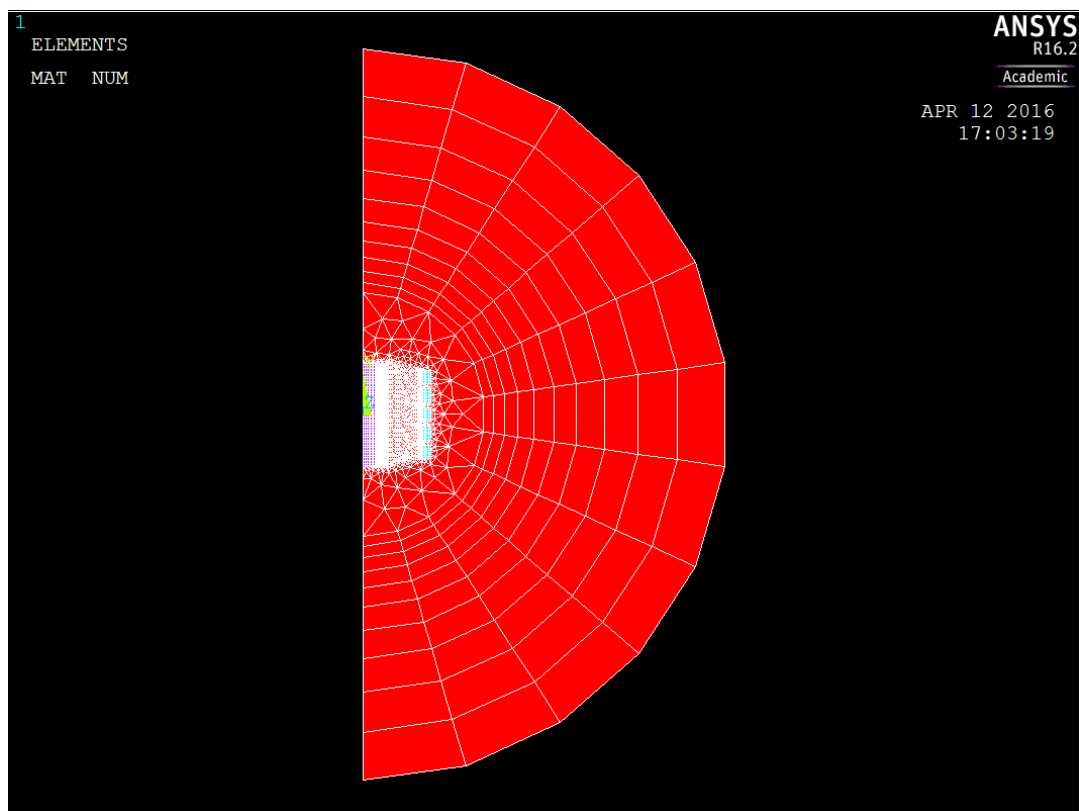


Рисунок 4.2 — Сетка

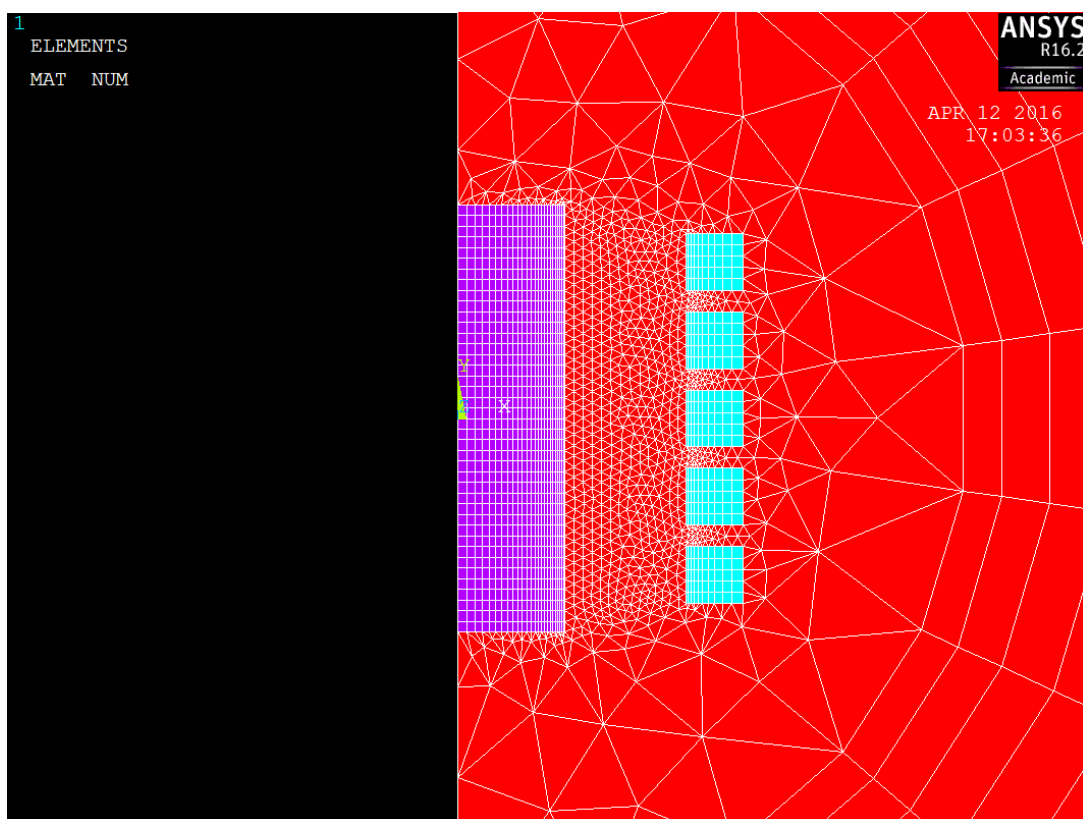


Рисунок 4.3 — Сетка, расположение объектов

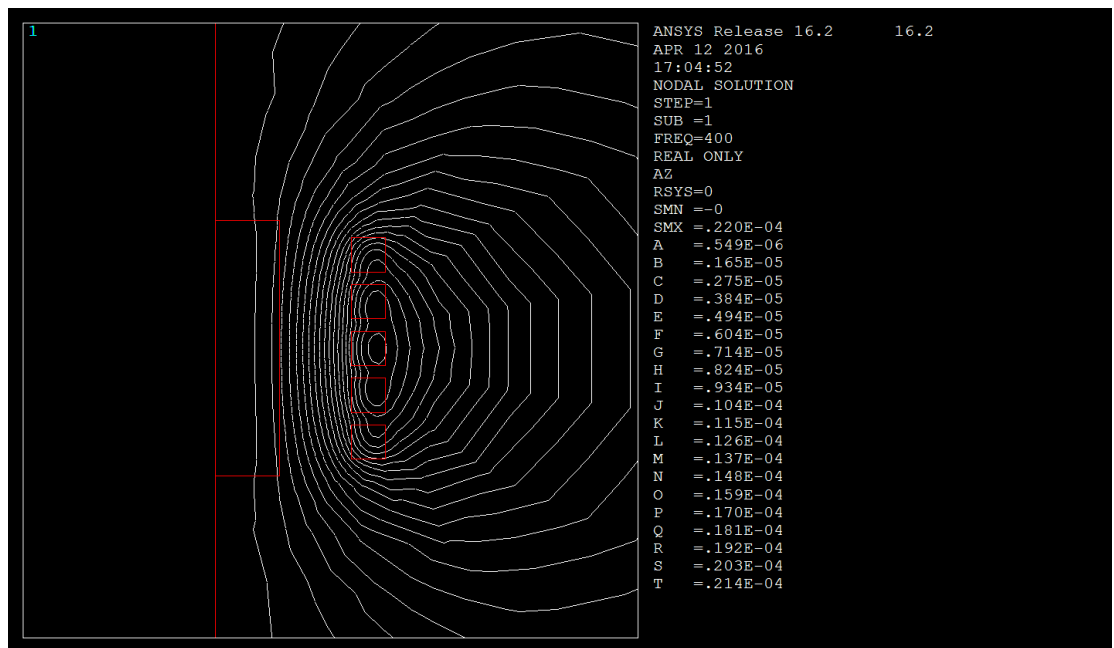


Рисунок 4.4 — Магнитные линии

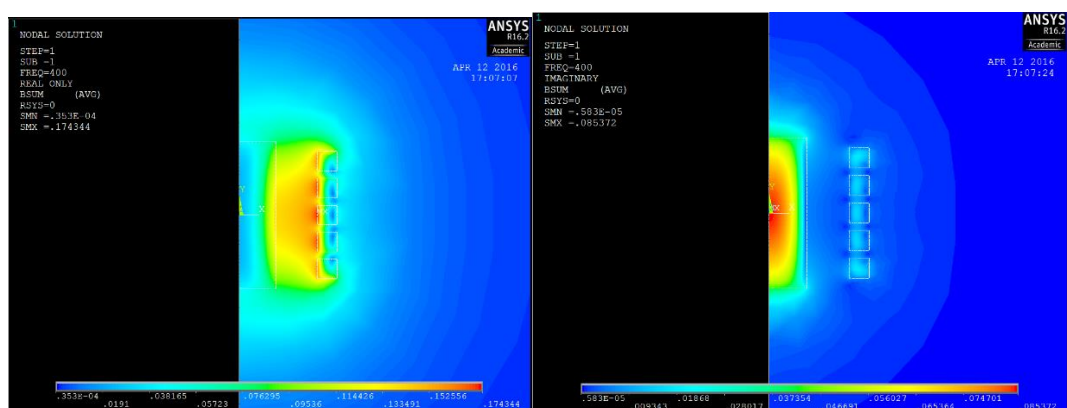


Рисунок 4.5 — Реальные и мнимые составляющие магнитной индукции в расположенной области



Рисунок 4.6 — Распределение токов в системе индуктор – заготовка
(реальное и мнимое)

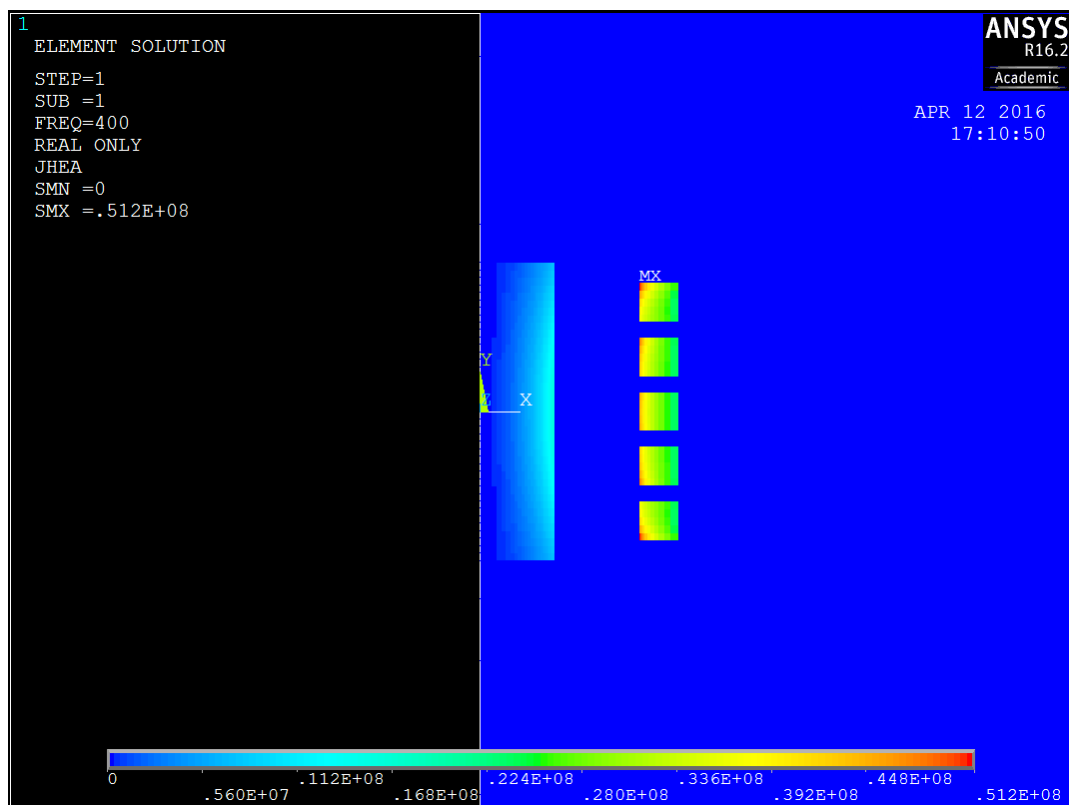


Рисунок 4.7 — Джоулева теплота в индукторе и заготовке

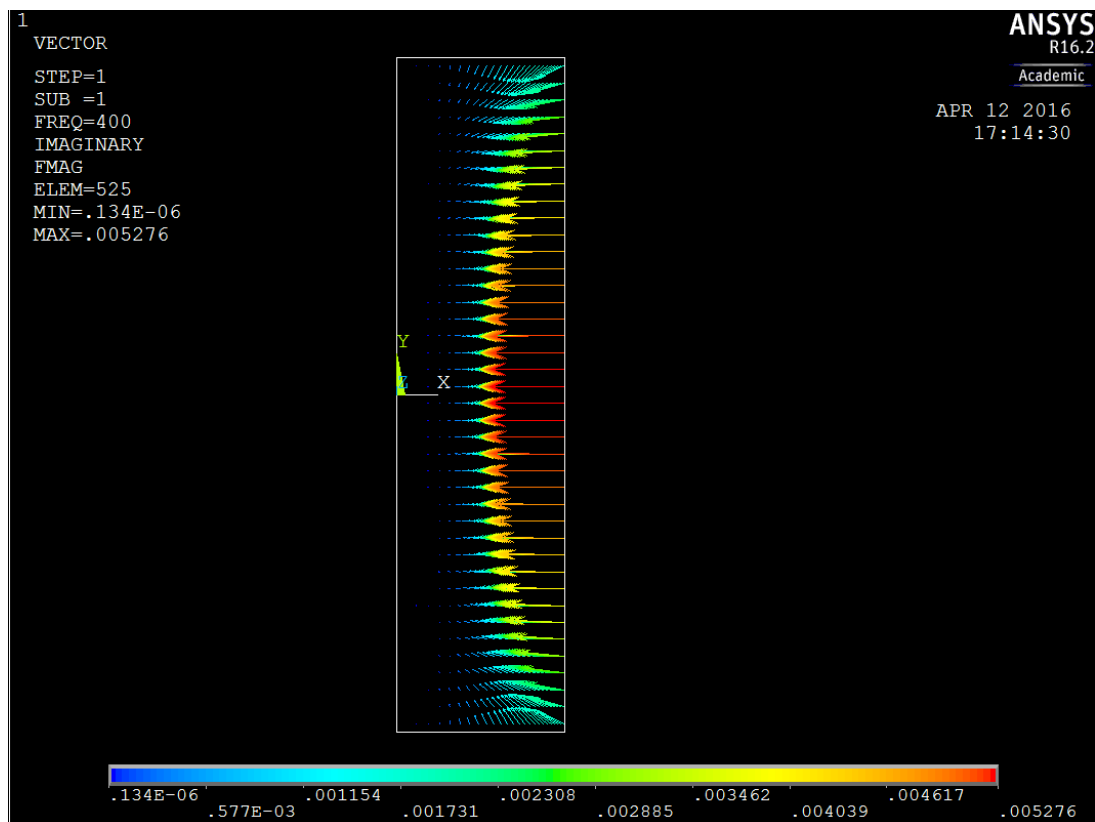


Рисунок 4.8 — Силы Лоренца в заготовке

Расчет интегральных параметров системы на основе результатов численных расчетов дифференциальных характеристик системы:

$$P = \int_v \rho \dot{\delta}^2 dV = \sum_i \left(\rho_i \left(\left[\dot{\delta}_{rei} \right]^2 + \left[\dot{\delta}_{imi} \right]^2 \right) \right), \quad (4.1)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление i -ого элемента, Ом·м;

$\dot{\delta}_{rei}$ и $\dot{\delta}_{imi}$ — комплексная плотность тока в i -ом элементе, А/м²

$P_1 = 554$ Вт — активная мощность в индукторе (потери);

$P_2 = 62$ Вт — активная мощность в заготовке.

Реактивная мощность системы, Вар:

$$Q = \frac{1}{2} \omega \int_v \frac{B^2}{\mu \mu_0} dV = \frac{1}{2} 2\pi \times f \frac{1}{\mu_0} \sum_i \left(\frac{1}{\mu_i} \left([B_{rei}]^2 + [B_{imi}]^2 \right) \right), \quad (4.2)$$

где μ_i — магнитная проницаемость i -ого элемента, $\frac{\Gamma H^2}{M}$;

B_{rei} и B_{imi} — комплексная магнитная индукция в i -ом элементе, Тл;

$$Q = 108 \text{ Вар.}$$

Электрический КПД системы:

$$\eta_3 = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = 0,1. \quad (4.3)$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P_1 + P_2}{\sqrt{(P_1 + P_2)^2 + Q^2}} = 0,98. \quad (4.4)$$

Комплексное сопротивление системы, Ом:

$$z = r + jx = \frac{P_1 + P_2}{I^2} + j \frac{Q}{I^2} = 0,00071 + j0,00012. \quad (4.5)$$

Напряжение, В:

$$U=I \times |z|=0,7, \quad (4.6)$$

где I – амплитудное значение тока, А

Сравним полученные характеристики:

Таблица 4.2 – итоговые данные

Величина	Инженерный расчет	Численный расчет
P_1 , Вт	215	554
P_2 , Вт	217,7	62
U , В	5.5	0,7
$\cos\varphi$	0,322	0,98
r , Ом/виток ²	0,0019	0,00071
x , Ом/виток ²	0,0056	0,00012

5 Экспериментальная часть

В экспериментальной части создавался компонент, который включается в расплав, для его укрепления.

Эксперимент проходил по следующему плану.

Подготовка образцов.

1. Помещение образцов в матричную заготовку.
2. Расплав матричной заготовки с образцом (распределение образца по объему матрицы).

5.1 Описание образцов.

1. С-нафен.



Рисунок 5.1 — Нафен с углеродной рубашкой. Получен в проточной газовой камере (поток этилового спирта). Температура синтеза – 600°C

2. М-нафен.



Рисунок 5.2 - Нафен модифицированный производителем

5.2 Подготовка образцов.

Образцы помещались в вакуум и выдерживались в нем 24 часа. Затем помещались в ступку и измельчались до состояния порошка.

5.3 Ход эксперимента

Подготовленные образцы помещались в матричную алюминиевую заготовку, затем запрессовывались и закрывались крышкой (шпон из алюминиевой фольги).

Матричная алюминиевая заготовка представляет собой алюминиевый стержень (матрица), в котором высверлено отверстие под образец.



Рисунок 5.3 — Вид алюминиевой заготовки



Рисунок 5.4 — Помещение образца в алюминиевую заготовку

Далее заготовка с образцом помещалась в тигель, в котором происходил расплав алюминия.



Рисунок 5.5 — Тигель. Помещение заготовки с образцом в тигель

После помещения заготовки в тигель, вся система помещается в держатель для индукционного нагрева заготовки.



Рисунок 5.6 — Помещение тигля с заготовкой в печь

Производилось две загрузки:

1. Загрузка с М-нафеном. Эксперимент прошел по плану. Заготовка расплавилась. Образец наружу не вышел.



Рисунок 5.7 – Згрузка с М-нафеном

2. Загрузка с С-нафеном. В ходе эксперимента. В момент расплава заготовки, часть образца выстрелило облаком наружу. Вероятнее всего это произошло, из-за того, что часть углеродной рубашки при горении образца перешло в газообразную форму.



Рисунок 5.8 — Загрузка с С-нафеном

5.4 Описание результатов

После полного остывания, заготовки распиливались для подготовки тестовых образцов на микроскопию. Но в процессе распила заготовки выяснилось, что распределения порошкообразного образца по массиву матрицы не произошло как в первом, так и во втором образцах.

Образец №1. М-нафен.



Рисунок 5.9 — М-нафен

После распила заготовки, выяснилось, что М-нафен спекся в таблетку. Распределения по матрице не произошло. Возможно, не хватило времени либо, не было смачивания.

Образец №2. С-нафен.

После распила заготовки, выяснилось, что С-нафен, остался в порошкообразном состоянии перехода в массив матрицы не произошло. Причиной возможно стала, полость с воздухом, при выбросе части образца во время эксперимента. Также возможными причинами могли стать, как малое время выдержки при расплавленном состоянии либо отсутствие смачиваемости образца в расплаве алюминия.



Рисунок 5.10 — С-нафен

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы, были углублены и применены навыки компьютерного моделирования в CAD – системах, численного моделирования физических процессов в CAE системах, теоретического и экспериментального использования индукционных систем. Был создан алгоритм для инженерного расчета для индукционных тигельных печей малой емкости в программе MathCad.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ООО «РУССКИЙ ИНДУКТОР» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rusinductor.ru/>
2. ООО «АМАЛЬГАМА» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://amalgamaspb.ru/induktor>
3. Пат. 2 433 365 Российская Федерация, МПК F 27 В 14/06, F 27 D 11/06. Индукционная тигельная печь / Тимофеев Виктор Николаевич, Тимофеев Николай Викторович, Христинич Роман Мирославович, Темеров Александр Алексеевич, Первухин Михаил Викторович, Сергеев Николай Вячеславович, заявл. 09.03.2010; опубл. 10.11.2011.
4. Пат. 2 536 311 Российская Федерация, МПК F 27 В 14/06, F 27 D 11/12, F 27 D 27/00. Электромагнитная тигельная плавильная печь с С-образным магнитопроводом и горизонтальным магнитным потоком / Левшин Геннадий Егорович, Сергеев Семен Юрьевич, заявл. 12.03.2013; опубл. 20.09.2014.
5. Пат. 2 390 700 Российская Федерация, МПК F 27 В 14/08, F 27 D 27/00, H 05 В 6/34. Турбоиндукционная тигельная печь / Лузгин Владислав Игоревич, Петров Александр Юрьевич, Сарапулов Федор Никитич, Сарапулов Сергей Федорович, заявл. 27.10.2009; опубл. 27.05.2010.
6. Пат. 109 281 Российская Федерация, МПК F 27 В 14/10, F 27 В 14/12. Индукционная тигельная печь / Вертман Александр Абрамович, Полуэктов Павел Петрович, Радченко Михаил Владимирович, заявл. 27.10.2009; опубл. 27.05.2010.
7. Пат. 2101639 Российская Федерация, МПК F 27 D 11/06, F 27 В 14/08, C 21 C 5/52. Способ плавки металла в индукционной печи с холодным тиглем / Губченко А.П.
8. Проектирование индукционных тигельных печей: методическое пособие / Р.М. Христинич, В.Н. Тимофеев, М.В. Первухин. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 48с.

9. Mathcad 14 для студентов и инженеров / В.Ф. Очков. - С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007.
10. MathCAD 11. Самоучитель / Д.Кириянов. - С-Пб.:БХВ-Петербург, 2003.
11. ANSYS: справочник пользователя / Басов К.А – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с
12. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк, 2003
13. Основы анализа конструкций в ANSYS: Учебное пособие / Конюхов А.В. - Казань: Изд-во КГУ, 2001. - 102 с.
14. Индукционные плавильные печи. Учебное пособие для вузов / Вайнберг А.М. Изд. 2-ое перераб. и доп. М.: Энергия 1967. 416 с.
15. Индукционные тигельные печи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Л.И.Иванова, Л.С.Гробова, Б.А.Сокунов, С.Ф.Сарапулов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ - УПИ, 2002. 87 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ